



Revista de la Construcción

ISSN: 0717-7925

revistadelaconstrucion@uc.cl

Pontificia Universidad Católica de Chile  
Chile

Sanhueza, C.; Villavicencio, G.

Influencia de la cohesión aparente generada por raíces sobre la estabilidad de un talud natural en las dunas de Reñaca

Revista de la Construcción, vol. 11, núm. 1, abril, 2012, pp. 16-31  
Pontificia Universidad Católica de Chile  
Santiago, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127623090003>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

*Effect of apparent cohesion  
from tree roots on the  
stability of natural slopes of  
Reñaca dunes*

# Influencia de la cohesión aparente generada por raíces sobre la estabilidad de un talud natural en las dunas de Reñaca



## Autores

**SANHUEZA, C.** Pontificia Universidad Católica de Chile  
csanhuep@uc.cl  
Santiago, Chile

**VILLAVICENCIO, G.** Pontificia Universidad Católica de Valparaíso  
gabriel.villavicencio.a@exa.pucv.cl  
Valparaíso, Chile

**Fecha de recepción** 05/03/2012

**Fecha de aceptación** 30/03/2012

## Resumen

Diversas investigaciones han demostrado que la vegetación cumple un importante rol en la prevención de movimientos en masa de suelos, especialmente, los relativos a deslizamientos superficiales de taludes. De esta manera, las raíces de los árboles proporcionan un sistema de refuerzo que depende en gran medida de la conformación y de la distribución del sistema radicular que presenten.

El presente artículo corresponde a una investigación aplicada sobre un talud natural en un sector de Reñaca, Chile, en el cual se ha planteado como

objetivo analizar la influencia de la cohesión aparente que generan las raíces de los árboles existentes en dicho talud. Para ello, se han efectuado una serie de cálculos bajo dos escenarios: por una parte, asumiendo condiciones estáticas y, por otra, considerando los antecedentes obtenidos a partir del terremoto del año 1985 ( $M_w 8.0$ ), lo cual ha permitido obtener resultados para un escenario bajo condiciones pseudostáticas. Como resultado de ello, se han podido obtener los distintos factores de seguridad y una estimación de los desplazamientos sísmicamente inducidos.

**Palabras clave:** Cohesión aparente, taludes, desplazamientos.

## Abstract

*Several researches have shown that vegetation plays a key roll in preventing displacements of soil masses, particularly of surficial displacement of slopes. Thus, tree roots provide a reinforcement system that depends on its structure and distribution.*

*This article presents a research applied to a natural slope in Reñaca-Chile, and*

*the objective is to analyze the apparent cohesion developed as a result of roots existing in the slope. The analysis of the problem was conducted for two scenarios: static loading and a pseudostatic loading based on data collected after the 1985 Chile earthquake ( $Mw 7.8$ ). From this analysis, different factors of safety and seismically induced displacements have been estimated.*

**Keywords:** Apparent cohesion, slope, displacements.

## 1. Introducción

El presente artículo nace como resultado de un estudio geotécnico llevado a cabo en un talud natural ubicado en la Quinta Región del país, patrocinado por el Museo de la Moda.

El principal objetivo de esta investigación fue analizar la influencia de la cohesión aparente generada por las raíces de los árboles sobre la estabilidad de un talud, en la cual se efectuaron cálculos bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas. A partir de ello, se ha podido obtener una estimación de los desplazamientos sísmicamente inducidos.

Las laderas en general presentan una inclinación natural que las puede mantener estables durante un determinado tiempo. Sin embargo, si por alguna razón se producen cambios en su morfología, podría ocurrir una modificación en sus condiciones de equilibrio que la lleven a que se originen desplazamientos de la masa de suelo. Desde esta perspectiva, los movimientos de laderas pueden entenderse como aquellas modificaciones que debe realizar el suelo, con el fin de reencontrar el equilibrio ante alguna variación en su situación natural (González de Vallejo *et al.*, 2002).

Factores como la gravedad de los materiales que componen un talud resultan ser una de las principales causas de los movimientos de laderas. A esta fuerza se le oponen la resistencia al corte del suelo y la de las raíces, entre otras.

## 2. Factores asociados a la cohesión aparente generada por las raíces de los árboles

Investigaciones llevadas a cabo por diferentes autores, tales como Abe y Ziemer (1991), O'Loughlin y Ziemer (1999) y Schmidt *et al.* (2001), entre otros, han demostrado la importancia del rol que cumplen las raíces de los árboles y la vegetación en general, en la prevención de movimientos en masa de suelos, sobre todo, en cuanto a los deslizamientos superficiales de taludes.

De acuerdo a lo anterior, los posibles factores asociados con la vegetación arbórea que afectan la estabilidad de una masa de suelos, son los siguientes:

- *Por transmisión de las fuerzas del viento y acuñamiento de las raíces:* aunque frecuentemente los árboles pueden volcarse ante la acción de fuertes vientos en taludes con importantes pendientes, generando una perturbación en el manto superficial

del suelo y, de esta manera, iniciando la activación de potenciales superficies de deslizamiento, los efectos favorables que generan las raíces de los árboles sobre la estabilidad son aún más importantes.

- *Por incremento de sobrecarga:* la sobrecarga debida al peso propio de la vegetación, generalmente, no representa una carga importante. En relación a lo anterior, una serie de estudios realizados por Bishop y Stevens (1964), demostraron que el esfuerzo de corte activado en dirección "talud abajo" en un bosque maduro puede ser insignificante, debido al incremento de la resistencia al corte del suelo generado por la acción de la sobrecarga.
- *Por modificación del contenido de humedad y presiones de poros en el suelo:* la vegetación modifica las condiciones hidrológicas de un talud debido a factores asociados al follaje, tales como: intercepción de las lluvias, retención, acumulación, goteo y evapotranspiración.
- *Por generación de un estrato superficial orgánico:* en la mayoría de los bosques se genera un estrato orgánico, constituido por hojas, humus y raíces de los árboles, que protege al suelo natural de las lluvias y de la erosión que genera tanto la acción del viento como las aguas de escorrentía superficial.
- *Por reforzamiento mecánico del suelo:* las raíces refuerzan el suelo incrementando la resistencia al corte, debido a que éstas actúan como tensiles de resistencia. Por otra parte, el anclaje de los troncos genera que éstos actúen como pilares o puentes en los taludes, contrarrestando las tensiones de corte y restringiendo lateralmente el movimiento superficial de las superficies potencialmente inestables.

*El refuerzo de las raíces es el mecanismo más común asociado a la influencia de la vegetación en la estabilización de taludes. En relación a la resistencia que confieren las raíces al suelo, ésta depende de la conformación y de la distribución del sistema radicular.*

## 3. Mecanismo de reforzamiento del suelo y estabilización de taludes por las raíces de los árboles. Estimación de la cohesión "aparente"

En la práctica ingenieril es ampliamente aceptado que las raíces actúan como un sistema de refuerzo aumentando la resistencia al corte de los suelos, cuya influencia puede ser expresada como una cohesión "aparente" adicional en términos del criterio de falla

de Coulomb (O'Loughlin y Ziemer, 1999; Schmidt *et al.*, 2001; Bransby *et al.*, 2006). De esta manera, la resistencia al corte del sistema suelo-raíz puede ser expresado mediante la siguiente ecuación:

$$\tau_f = c' + c_R + (\sigma - \mu) \tan \phi' \quad (1)$$

Donde:

$\tau_f$  : resistencia al corte del sistema suelo-raíz

$c'$  : cohesión efectiva del suelo

$c_R$  : cohesión "aparente" aportada por las raíces

$\sigma$  : esfuerzo normal debido al peso del suelo

$\mu$  : presión de poros

$\phi'$  : ángulo efectivo del suelo

Wu *et al* (1979) propuso la siguiente relación para estimar la cohesión "aparente" aportada por las raíces en función del tensil total de esfuerzo de las raíces ( $T_R$ ):

$$c_r \cdot T_R \text{ con } T_R = \sum_{i=1}^n t_{ri} \cdot \left( \frac{A_{ri}}{A_s} \right) \quad (2)$$

Donde  $A_{ri}/A_s$  corresponde al coeficiente entre la sección de la raíz interceptada por la superficie de falla (Ari) y la sección del suelo potencialmente inestable ( $A_s$ ), y  $n$  es el número de raíces existentes en la sección  $A_s$ .

### 3.1 Sistema radicular de la zona en Estudio

La zona en estudio corresponde a un talud natural en las dunas de Reñaca, donde predominan depósitos de sedimentos eólicos asignados al Cuaternario. Estas dunas, ubicadas entre Las Salinas y Concón, se encuentran estabilizadas ("duna vieja") y en profundidad presentan cierta cementación (Grimme y Álvarez, 1964); pero existen áreas en que se encuentran activas ("duna nueva"), donde la primera capa de esta presenta raíces y raicillas, con una profundidad máxima entre 0.8 a 1.0 m. Ambas dunas están constituidas por más del 80% de arena fina, con una porosidad y permeabilidad muy altas.

En el sector antes descrito y donde se llevó a cabo la investigación (Figura 1), las especies arbóreas existentes que predominan corresponden al tipo de *Pinus radiata*

**Figura 1.** Vista en planta de la zona en estudio



Fuente: Vista en planta de la zona en estudio.

*D. Don* y *Eucaliptus globulus*, tal como se observan en la Figura 2.

Considerando la clasificación propuesta por Pritchett (1986), este tipo de especies presenta un sistema radicular tipo "radiado" caracterizado por su poca profundidad, con fuertes ramificaciones laterales a partir de las cuales se desarrollan ramificaciones en dirección vertical. Según la descripción propuesta por Ashton (1975), el sistema radicular asociado a este tipo de especies presenta las siguientes características:

- *Pinus radiata D. Don*: el 85% de las raíces se encuentra dentro de los primeros 50 cm de profundidad. Las raíces verticales que se desarrollan de las ramificaciones horizontales producen extensiones o brazos lejanos al tronco, que logran penetrar en el suelo a una profundidad equivalente a la raíz principal. Las longitudes radiculares son mayores a 3.0 m con diámetros máximos superiores a 10.0 cm.
- *Eucaliptus globulus*: especie de crecimiento muy rápido con una vida relativamente corta. El sistema radicular es superficial con raíces pivotantes a profundidades mayores a 2.0 m. El mayor desarrollo radicular se encuentra entre los 15.0 a 45.0 cm de profundidad y cerca del 96% de las raíces se concentra en los primeros 60.0 cm. La longitud de las raíces principales pueden llegar a 8.0 m, con un diámetro promedio de 20.0 cm y pocas raíces secundarias.

En la Figura 3, se observa el sistema radicular y las raíces de las especies arbóreas existentes en el sector en estudio.

### 3.2 Estimación de la cohesión "aparente" generada por las raíces de los árboles

Para llevar a cabo los análisis de estabilidad de taludes se requiere la estimación de la cohesión "aparente" de las raíces ( $C_R$ ), para la cual existen diferentes metodologías. Dentro de ellas, se pueden mencionar las siguientes: a partir de ensayos de corte directo realizados in situ a diferentes escalas sobre sistemas suelo-raíz particulares; mediciones del diámetro de las raíces y de su resistencia; "back-análisis" en taludes forestados que presentaron inestabilidades mecánicas; y modelos de resistencia e información de la densidad de las raíces.

A partir de antecedentes bibliográficos y considerando el sistema radiado que presentan las especies arbóreas del sector, se ha adoptado un rango de valores para la cohesión "aparente" de las raíces ( $C_R$ ) comprendido entre 1.0 y 20 KPa, de acuerdo a los valores propuestos por O'Loughlin y Ziemer (1999).

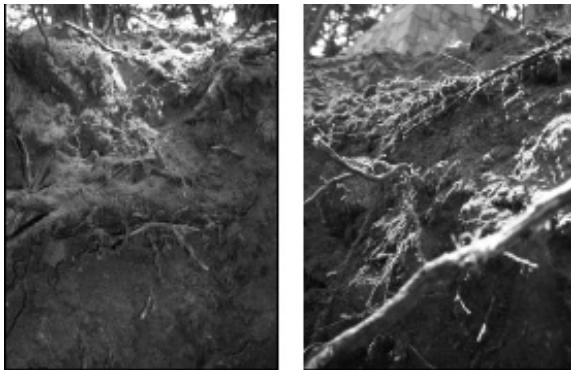
## 4. Antecedentes empleados y metodología de trabajo

Con el objeto de llevar a cabo los análisis de estabilidad del talud del sector en estudio, bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas, junto con estimar las deformaciones sísmicamente inducidas, fue necesario proceder con la metodología de trabajo que se explica a continuación.

**Figura 2. Especies arbóreas predominantes en el talud en estudio**



**Figura 3.** Raíces de las especies arbóreas existentes en el sector en estudio



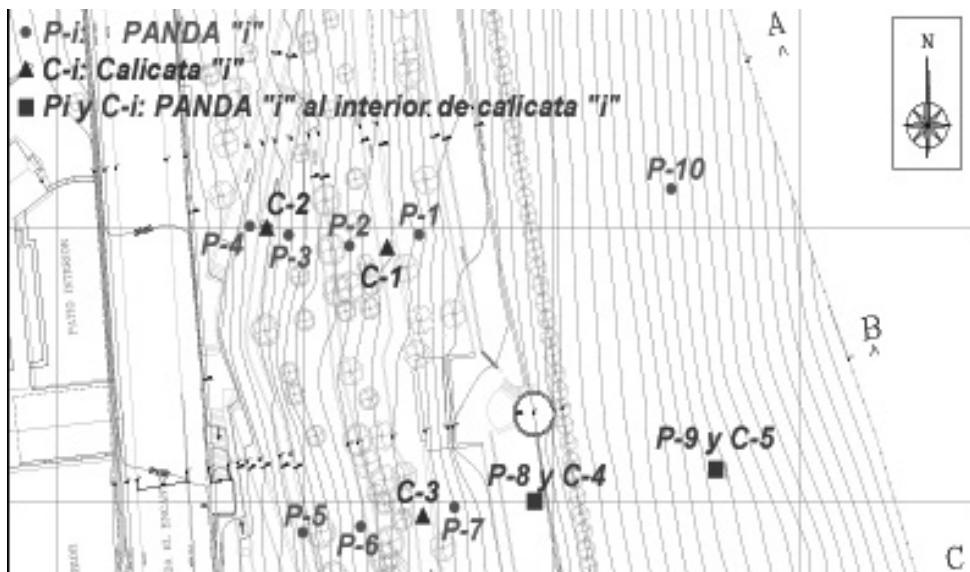
En primer lugar, se llevaron a cabo una serie de visitas técnicas, con el propósito de recopilar información tanto en poder del mandante como aquella disponible en los archivos municipales. A continuación, se realizó una inspección del sitio para definir *in situ* los trabajos de terreno a desarrollar.

A partir de antecedentes topográficos de la zona en estudio, se seleccionaron dos perfiles considerados representativos de la geometría del talud, determinándose: altura y pendiente del talud; inclinación de los árboles presentes (según su grado de reptación); y, sobrecargas existentes en la cara y/o coronamiento del talud.

Posteriormente, se realizó la exploración del terreno en base a cinco calicatas, distribuidas en los dos perfiles (Figura 4). De ellas se extrajeron muestras de suelo representativas, para efectuar ensayos de caracterización física (granulometrías, límites de Atterberg, contenido de humedad, densidad *in situ* y densidad relativa) y mecánica (corte directo CD). Adicionalmente, se efectuaron ensayos de penetración dinámica con el equipo PANDA. A partir de los resultados obtenidos de estas pruebas, se procedió a la caracterización geotécnica de los suelos presentes.

El estado de compacidad natural y los parámetros geotécnicos de los materiales encontrados en el área de estudio, han sido estimados tanto a nivel superficial como en profundidad. Ello, a partir de ensayos de resistencia realizados en laboratorio y de correlaciones desarrolladas en función de la resistencia por punta ( $q_d$ ) obtenida del ensayo de penetración PANDA (Sanhueza y Villavicencio, 2010).

**Figura 4.** Emplazamiento de los puntos de prospección: Perfil 1 puntos de prospección P1, P2, P3, P4 y P10; Perfil 2 puntos de prospección P5, P6, P7, P8 y P9.



## 5. Investigación geotécnica del terreno

A partir de la campaña geotécnica del terreno realizada para el desarrollo de la investigación, se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla 1.

En la Figura 5 se muestran los perfiles de resistencia a la penetración de punta (qd) en función de la profundidad en dos puntos de prospección de la zona en estudio (P1 y P3 de la Figura 4).

En la Tabla 2 se presenta un resumen con los valores de la resistencia a la penetración de punta (qd) obtenidos del ensayo *PANDA* y sus correlaciones con el índice de resistencia a la penetración estándar ( $N_{SPT}$ ) y con el índice a la penetración de cono ( $N_{DCPT}$ ), para el estrato de duna vieja.

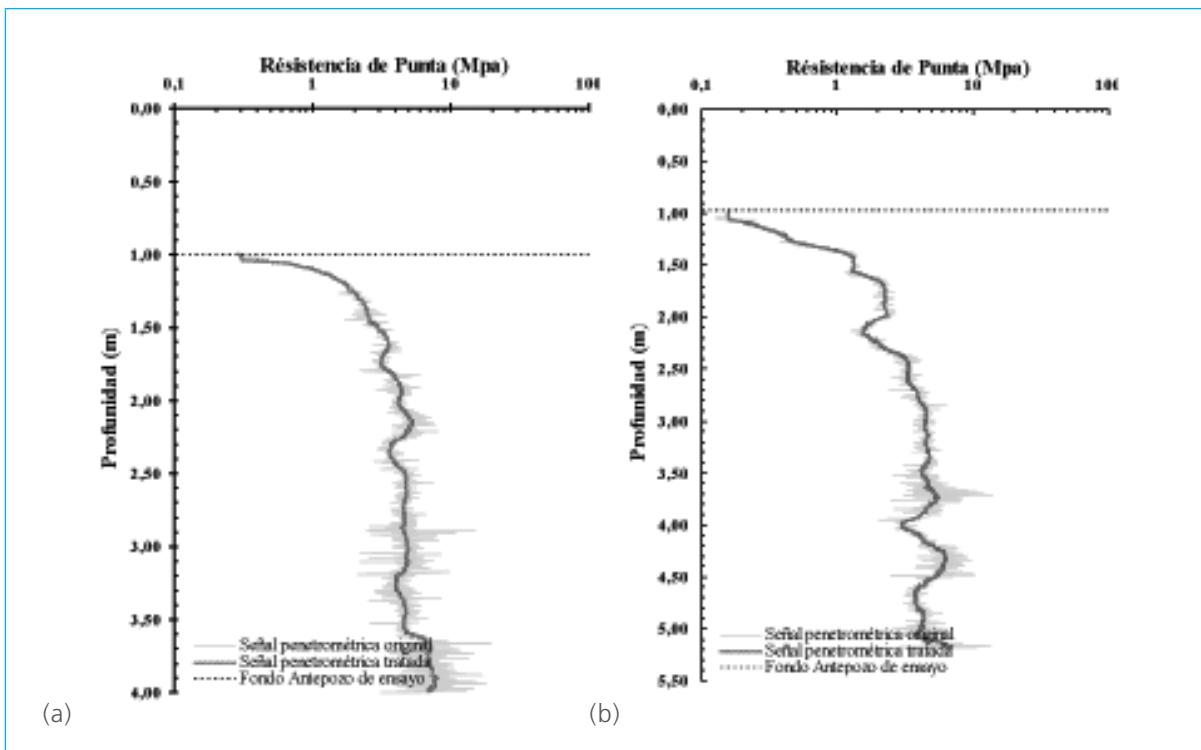
Con los antecedentes obtenidos de la campaña geotécnica se pudo establecer el siguiente perfil estratigráfico de la zona en estudio (Figura 6).

**Tabla 1.** Resumen de características físicas, estado de compacidad y parámetros resistentes de la zona en estudio

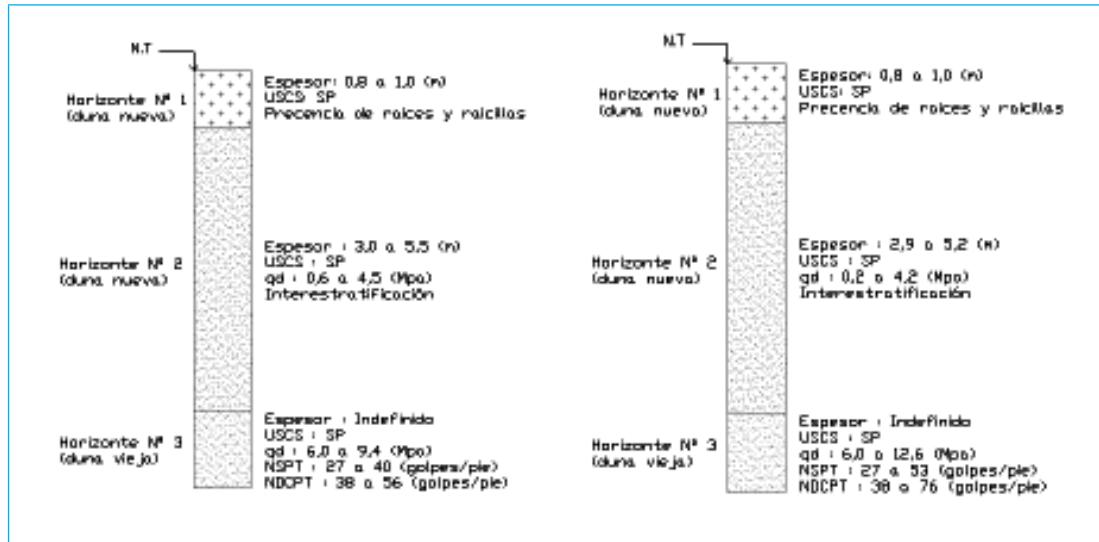
Nombre local	Clasificación USCS	Densidades mínima y máxima		Densidad y humedad in-situ		Densidad relativa DR%	Ang. fricción (*) f'
		gdmin, (grs/cm <sup>3</sup> )	gdmáx, (grs/cm <sup>3</sup> )	gd (grs/cm <sup>3</sup> )	w (%)		
Duna Activa	SP	1,48-1,53	1,75-1,80	1,64-1,71	1,6-3,5	56-77	34

(\*): el ángulo de fricción ha sido determinado a partir de ensayos de resistencia al corte realizados sobre probetas compactadas a la densidad in situ.

**Figura 5.** Perfiles de resistencia a la penetración (a) P1 (b) P3



**Figura 6.** Estratigrafía de la zona en estudio para los dos perfiles identificados según la Figura 4



**Tabla 2.** Parámetros de resistencia

Perfil	qd (MPa)		N <sub>SPT</sub> (golpes/pie)		N <sub>DCPT</sub> (golpes/pie)	
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
N° 1	6,0	9,4	27	40	38	56
N° 2	6,0	12,6	27	53	38	76

En relación al estado de compacidad de los materiales analizados, se identificó un primer estrato (duna nueva) de espesor variable con densidad relativa que fluctuó entre 24% y 73%, alcanzándose un estado de compacidad muy suelta a nivel superficial y medianamente densa a densa en profundidad. Su comportamiento mecánico asociado varía desde el tipo contractivo al tipo dilatante. Para profundidades superiores a 6 m, la densidad relativa aumenta progresivamente en profundidad, alcanzando un estado de compacidad medianamente denso a denso. Bajo esta condición el comportamiento mecánico es del tipo dilatante, propio de la duna vieja.

El ángulo de fricción interna en profundidad ha sido estimado a partir de la resistencia de punta normalizada ( $qd_{N1}$ ), considerando la relación propuesta por Díaz y Rodríguez-Roa (2007). Los resultados se muestran en la Tabla 3.

Finalmente, la relación entre la densidad relativa y el ángulo de fricción interna efectivo, se deducen de la Figura 7 (Sanhueza y Villavicencio, 2010).

## 6. Cálculo de la estabilidad del talud natural en la zona en estudio

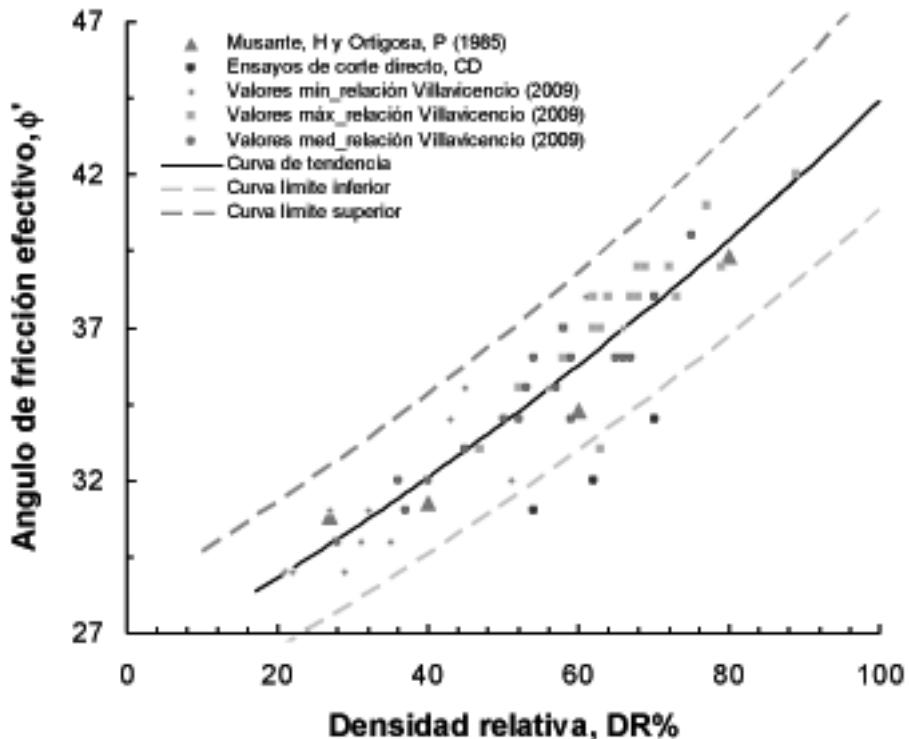
### 6.1 Características de la zona de emplazamiento

A nivel local, la zona de Reñaca se ubica en el borde erosionado de un acantilado costero de 100 a 120 m de altura sobre el nivel medio del mar. El borde inferior de este acantilado está constituido por un angosto remanente, que habría sido una antigua terraza fluvio-marina. La playa se desarrolla entre 0.0 y 6.0 m sobre el nivel medio del mar, aflorando promontorios rocosos solo en el extremo norte.

**Tabla 3.** Variación del ángulo de fricción efectivo ( $\phi'$ )

Sector	Perfil	Estrato	Espesor medio (m)	Ángulo de fricción efectivo, $\phi'$ (°)		
				Mínimo	Máximo	Promedio
Talud	Nº 1	1	3.0 a 5.0	34	40	37
		2	> 5.0	38	40	39
	Nº 2	1	3.0 a 5.3	32	39	36
		2	> 5.3	32	41	39

**Figura 7.** Relación %DR y ángulo de fricción efectivo



Considerando lo anterior, Musante & Ortigosa (1985) dedujeron que sobre el basamento rocoso yace un espesor de 120 m de sedimentos arenosos acuñados hacia el Este. Los sedimentos ubicados entre 0.0,

80.0 y 100.0 m sobre el nivel medio del mar, son fundamentalmente arenosos y limosos, de color pardo-amarillento de estratificación fina y parcialmente cementados en profundidad.

## 7. Consideraciones de análisis: hipótesis

Para analizar la estabilidad mecánica de los taludes existentes en el sector en estudio, se han planteado hipótesis de cálculo respecto a la estratigrafía, parámetros mecánicos, generación de flujos internos, efecto de las raíces y sobrecargas externas. Algunas de ellas se presentan a continuación:

a) Respecto a la homogeneidad, parámetros mecánicos:

- Se considera una condición de homogeneidad e isotropía, desde el punto de vista físico, en cada uno de los horizontes que conforman la estratigrafía de los sectores.
- La segunda capa de la "duna nueva", presenta un comportamiento mecánico puramente friccionante.
- La "duna vieja" presenta un comportamiento mecánico caracterizado por la fricción y la cohesión por cementación de las partículas de suelo.
- La variación de los parámetros resistentes es el resultado del estado de compacidad de los horizontes identificados.
- La variación de la densidad in situ y de los parámetros resistentes de los suelos es descrita por una función de distribución del tipo normal.
- A largo plazo se considera la generación de un aumento de los parámetros resistentes de la "duna nueva", fundamentalmente, relacionado con un aumento del ángulo de fricción interno.

b) En relación al efecto de las raíces:

- Las raíces existentes donde se encuentran emplazados los árboles, generan una "cohesión" adicional.
- La resistencia a la tensión de las fibras individuales de las raíces se moviliza completamente.
- Las raíces no generan un efecto sobre el ángulo de fricción del suelo.
- Todas las raíces fallan de manera simultánea durante el deslizamiento.
- Las raíces son flexibles e inicialmente se encuentran orientadas en dirección perpendicular a la superficie de falla.

### 7.1 Escenarios de cálculo

Los análisis de estabilidad, tanto en condiciones estáticas como pseudoestáticas, han sido realizados

considerando dos escenarios de cálculo. El primero de ellos tiene por objetivo analizar la condición de estabilidad actual, mientras que el segundo, ha buscado estimar la estabilidad futura de los taludes existentes en la zona en estudio.

En este segundo escenario se ha considerado un evento sísmico como los terremotos de los años 1906 y 1985; así como también, un aumento del estado de compacidad y de los parámetros resistentes.

### 7.2 Método de cálculo adoptado

Los análisis de estabilidad de taludes han sido realizados utilizando Métodos de Equilibrio Límite (MEL) y procedimientos de cálculo geotécnico clásicos ampliamente aceptados, tanto por la práctica nacional como internacional. Considerando una condición de homogeneidad de los horizontes existentes en el sector en estudio, las potenciales superficies de deslizamiento serían del tipo "talud" con una morfología aproximadamente no circular y plana poco profunda, como fue observado en los deslizamientos generados en el sector de Reñaca durante los sismos de julio de 1971 y de marzo de 1985 (Kort, 1985).

A partir de lo anterior, y considerando las recomendaciones prácticas, la evaluación de la estabilidad de taludes se ha realizado mediante el método de equilibrio plástico-límite bidimensional de Morgenstern-Price, para condiciones estáticas y sísmicas (análisis pseudoestáticos), en conjunto con el método de optimización geométrica de la potencial superficie de deslizamiento y de la definición de la zona mecánicamente más inestable.

Para la estimación de los potenciales desplazamientos de masa, asociados a las superficies de deslizamiento críticas, se ha empleado el método propuesto por Jibson (2007) desarrollado a partir del modelo de bloque deslizante de Newmark (1965).

### 7.3 Factor de seguridad adoptado

El factor de seguridad considerado como aceptable en estos casos, según el coeficiente sísmico de diseño, ha sido el sugerido por Hynes y Franklin (1984), perteneciente a la banda de valores propuesta por Dismuke (2002). Los valores mínimos adoptados para F.S se encuentran entre 1.0 y 1.1. Por lo tanto, cada vez que la aceleración máxima generada por un sismo sea superior al coeficiente sísmico seleccionado, se producirían fallas intermitentes y desplazamientos en la masa de los taludes, los cuales no darían origen a patologías ni alterarían el adecuado comportamiento mecánico a nivel global.

## 7.4 Aceleración sísmica y coeficiente sísmico

A partir del mapa de aceleraciones máximas propuesto por el Earthquake Hazards Program de la USGS (United States Geological Survey), y de las relaciones de atenuación propuestas por Ruiz y Saragón (2005), se han estimado a corto y largo plazo los valores de aceleración ( $a_{max}$ ) de 0,3g y 0,4g, respectivamente.

Como criterio de selección del coeficiente sísmico de diseño (C.S), se ha considerado que la aceleración máxima producida por un sismo, generalmente, actúa en fracción de segundos y, una vez que se ha producido el desplazamiento de la masa, esta es movilizada con una aceleración menor que la máxima generada por el sismo. La experiencia recomienda considerar en los análisis de estabilidad, bajo condiciones sísmicas, un C.S correspondiente a una fracción de la aceleración máxima.

Para la selección del C.S se deben considerar otros factores, tales como: la magnitud de la masa potencialmente deslizante; las consecuencias que provocarían deformaciones excesivas; y, deslizamientos en las zonas bajas de los taludes. A partir de lo anterior, el C.S empleado en los análisis ha sido igual a 0.15 y 0.20 para los análisis a corto y largo plazo, respectivamente.

## 7.5 Cálculo de la estabilidad del talud natural

Los análisis de estabilidad han sido realizados en los sectores considerados como más desfavorables desde el punto de vista mecánico, los cuales además, se encuentran directamente relacionados con la inclinación y longitud máxima de dichos taludes en el sector en estudio. El emplazamiento de los perfiles seleccionados se presenta en la Figura 8.

En las Figuras 9 a 11 se muestran los esquemas representativos de cada perfil, considerando la estratigrafía de los suelos estimada a partir de los antecedentes recopilados y de las señales penetrométricas, las cuales han sido obtenidas de los ensayos de penetración PANDA.

Los parámetros geotécnicos de entrada han sido definidos considerando los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia al corte realizados en laboratorio y las estimaciones realizadas en profundidad de la resistencia de punta ( $q_d$ ) normalizada (1.0 atm). Los valores obtenidos han sido contrastados con antecedentes recopilados de la bibliografía especializada, correspondiente a la caracterización geotécnica de las dunas de Reñaca (Kort, 1985; Musante y Ortigosa, 1985; Aguirre *et al.*, 1986).

En relación a la variabilidad de los parámetros mecánicos de los suelos existentes, esta ha sido considerada de

Figura 8. Emplazamiento de perfiles geométricos de cálculo

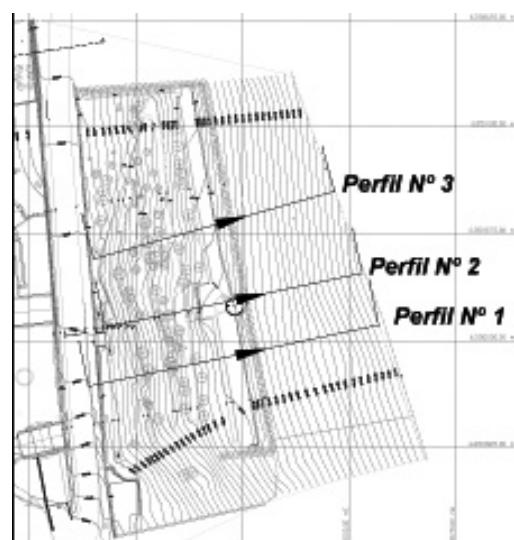
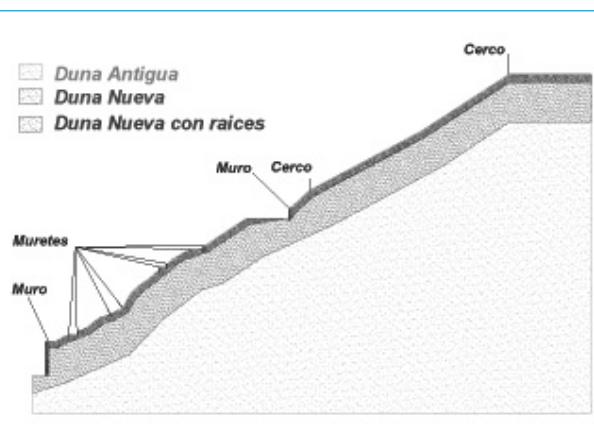


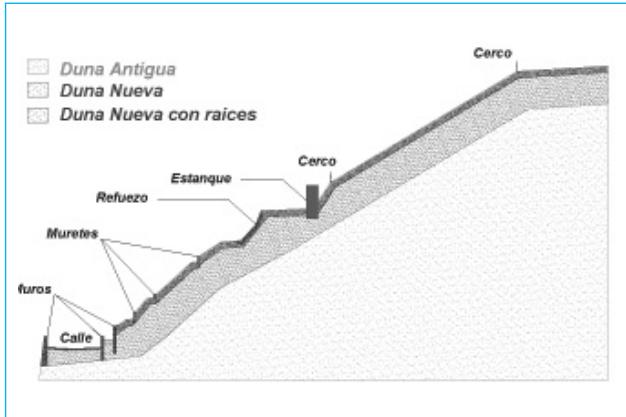
Figura 9. Esquema perfil geométrico de cálculo "Perfil N° 1"



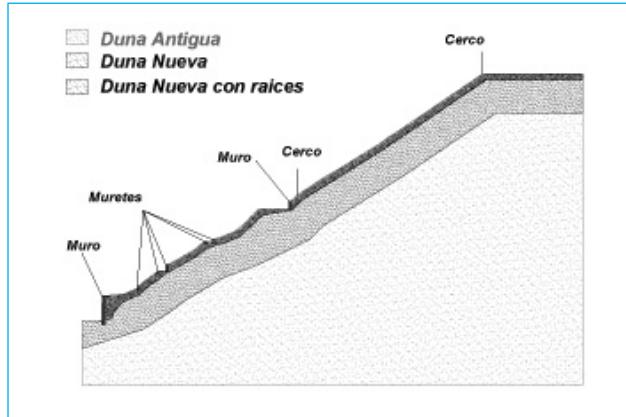
manera estimativa mediante un análisis estadístico de los parámetros estimados en profundidad y la adaptación de una ley de distribución teórica del tipo normal.

De esta manera, para cada uno de los estratos identificados, han sido estimados los valores que se presentan en la Tabla 4, los cuales corresponden a los parámetros que se han empleado en los análisis a corto plazo de la estabilidad mecánica de los taludes.

**Figura 10.** Esquema perfil geométrico de cálculo  
"Perfil N° 2"



**Figura 11.** Esquema perfil geométrico de cálculo  
"Perfil N° 3"



**Tabla 4.** Resumen de parámetros geotécnicos por cada perfil

Perfil 1										
Estrato	Densidad in situ $\gamma_t$ (ton/m <sup>3</sup> )			Ángulo de fricción efectivo, $\phi'$ (°)			Cohesión (Kpa)			
	Mín.	Máx.	Media	Mín.	Máx.	Media	Mín.	Máx.	Media	
1	1,51	1,67	1,59	31	33	32	10	12	11	
2	1,68	1,78	1,73	34	40	37	–	–	–	
3	2,1	2,30	2,20	37	40	33	100	200	150	
Perfil 2										
Estrato	Densidad in situ $\gamma_t$ (ton/m <sup>3</sup> )			Ángulo de fricción efectivo, $\phi'$ (°)			Cohesión (Kpa)			
	Mín.	Máx.	Media	Mín.	Máx.	Media	Mín.	Máx.	Media	
1	1,51	1,67	1,59	31	33	32	10	12	11	
2	1,68	1,78	1,73	34	39	36	–	–	–	
3	2,1	2,30	2,20	38	40	39	100	200	150	
Perfil 3										
Estrato	Densidad in situ $\gamma_t$ (ton/m <sup>3</sup> )			Ángulo de fricción efectivo, $\phi'$ (°)			Cohesión (Kpa)			
	Mín.	Máx.	Media	Mín.	Máx.	Media	Mín.	Máx.	Media	
1	1,51	1,67	1,59	31	33	32	10	12	11	
2	1,68	1,78	1,73	34	39	36	–	–	–	
3	2,1	2,30	2,20	38	42	40	100	200	150	

Considerando los antecedentes anteriormente descritos, se procedió al cálculo de la estabilidad del talud para los distintos escenarios.

En el primer escenario se consideró el método de Morgensterm-Price, a partir del cual se obtuvo una superficie potencial de falla como la que se muestra en la Figura 12. Los FS obtenidos en condiciones estáticas para la superficie crítica de deslizamiento están comprendidos entre 1,332 y 1,433; mientras que, para la zona de análisis, entre 1,332 y 2,032.

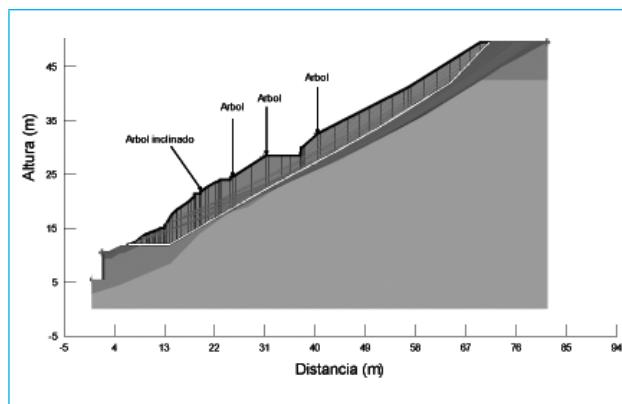
Bajo condiciones sísmicas a nivel global, los factores de seguridad que se han obtenido para la superficie crítica han sido iguales o superiores a la condición de equilibrio límite ( $F.S > 1,0$ ). En relación a la zona de

análisis, los valores se encuentran comprendidos entre 1,00 y 1,703.

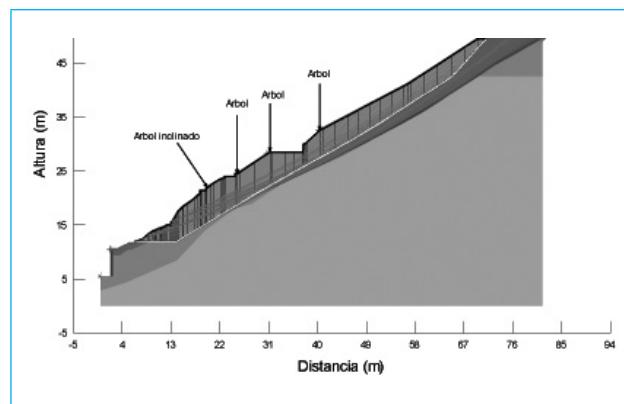
Los resultados que se han obtenido de los análisis de estabilidad de taludes realizados bajo condiciones estáticas y sísmicas (pseudoestáticas), para cada uno de perfiles de cálculo definidos en los sectores en estudio, se presentan en la Tabla 5.

Para el segundo escenario se consideró el método de Morgensterm-Price, a partir del cual se obtuvo una superficie potencial de falla como la que se muestra en la Figura 13, con lo cual se obtuvo un factor de seguridad en condiciones estáticas para la superficie crítica de deslizamiento entre 1,471 y 1,545; mientras que, para la zona de análisis, entre 1,471 y 1,904.

**Figura 12.** Superficie crítica potencial de deslizamiento. Perfil 1. Escenario 1 condiciones estáticas



**Figura 13.** Superficie crítica potencial de deslizamiento. Perfil 1. Escenario 2 condiciones estáticas



**Tabla 5.** Resultados análisis estabilidad de taludes. Condición estática y sísmica. Escenario 1

Perfil	Condición	Factor de Seguridad. Escenario de cálculo N° 1								
		Zona de análisis		Superficie crítica						
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Media	Desv. est	Prob. de falla (%)	Índice fiabilidad	
1	Estática	1,412	1,812	1,412	1,452	1,433	0,006	$10^{-5}$	75,55	
	Sísmica	1,055	1,455	1,055	1,086	1,070	0,004	$10^{-5}$	16,01	
2	Estática	1,332	2,032	1,332	1,362	1,348	0,005	$10^{-5}$	76,94	
	Sísmica	1,003	1,703	1,003	1,030	1,020	0,003	$10^{-5}$	4,77	
3	Estática	1,405	1,434	1,405	1,434	1,419	0,005	$10^{-5}$	89,30	
	Sísmica	1,042	1,456	1,042	1,067	1,056	0,003	$10^{-5}$	17,00	

Bajo condiciones sísmicas a nivel global, los factores de seguridad que se han obtenido para la superficie crítica han sido iguales o superiores a la condición de equilibrio límite ( $F.S > 1,0$ ). En relación a la zona de análisis, los valores se encuentran comprendidos entre 1,025 y 1,742.

Los resultados que se han obtenido de los análisis de estabilidad de taludes realizados bajo condiciones estáticas y sísmicas (pseudoestáticas), para cada uno de perfiles de cálculo definidos en los sectores en estudio, se presentan en la Tabla 6.

## 8. Análisis de resultados

A partir de los resultados obtenidos de la simulación de Monte Carlo realizada para cada perfil de cálculo, se ha podido concluir que a corto plazo (escenario 1) la probabilidad de falla global de los taludes analizados

sería prácticamente nula, considerando las hipótesis y criterios de cálculo adoptados.

El adecuado comportamiento mecánico de los taludes existentes en el sector en estudio se vio reflejado durante el terremoto del 3 de marzo de 1985, ya que no se generaron deslizamientos sísmicamente inducidos.

La morfología de las superficies de falla obtenidas representa mecanismos de falla típicos para los taludes existentes en el sector en estudio, caracterizados por superficies semiplanas del tipo "talud", las que se generarían dentro del estrato correspondiente a la "duna nueva".

En relación a la influencia de los árboles existente sobre la estabilidad de los taludes, esta se ha traducido en una disminución en la generación de deslizamientos superficiales o poco profundos. En efecto, los sistemas radiculares de las raíces de los árboles han

**Tabla 6.** Resultados análisis estabilidad de taludes. Condición estática y sísmica. Escenario 2

Perfil	Condición	Factor de Seguridad. Escenario de cálculo N° 2								
		Zona de análisis			Superficie crítica					
		Mín.	Máx.		Mín.	Máx.	Media	Desv. est	Prob. de falla (%)	Índice fiabilidad
1	Estática	1,504	1,904		1,504	1,545	1,527	0,006	$10^{-5}$	86,94
	Sísmica	1,025	1,425		1,025	1,057	1,042	0,004	$10^{-5}$	10,83
2	Estática	1,471	1,507		1,471	1,507	1,487	0,005	$10^{-5}$	92,07
	Sísmica	1,043	1,742		1,043	1,066	1,053	0,003	$10^{-5}$	15,45
3	Estática	1,503	1,903		1,503	1,538	1,518	0,005	$10^{-5}$	110,7
	Sísmica	1,023	1,423		1,023	1,044	1,034	0,003	$10^{-5}$	11,08

**Estimación de deslizamientos sísmicamente inducidos. Escenario 1**

Sector	Perfil	Talud medio	F.S	Acel. de fluencia	Acel. Máxima	ay/amax	Desplazamientos (cm)		
		(°)	Estático	ay (g)	amax (g)		Mín.	Medio	Máx.
Talud	1	33	1,412	0,227	0,3	0,567	0,1	0,3	0,9
	2	39	1,332	0,209	0,3	0,522	0,2	0,5	1,6
	3	34	1,405	0,226	0,3	0,564	0,1	0,3	0,9

formado una armadura de fibras entrelazadas ligadas íntimamente a la matriz del suelo, que ha reforzado su estructura e incrementado su resistencia al deslizamiento. Además, éstos han minimizado la acción erosiva tanto del viento como de las aguas lluvias, estabilizando superficialmente los suelos existentes en la zona en estudio.

En relación al escenario 2, los resultados obtenidos a partir de la simulación de Monte Carlo realizada para cada perfil de cálculo, indican que la probabilidad de falla a largo plazo de los taludes analizados sería prácticamente nula. Todo ello bajo las hipótesis y criterios de cálculo que se han adoptado en este escenario de análisis.

### 8.1 Estimación de desplazamientos sísmicamente inducidos

Con el objetivo de realizar una estimación de las deformaciones sísmicamente inducidas que se podrían generar en los taludes del sector en estudio para el escenario 1, considerando las actuales condiciones de estabilidad, se ha adoptado para el análisis la relación propuesta por Jibson (2007) expresada en función de la aceleración de fluencia ( $a_y$ ), correspondiente al valor de la aceleración sísmica que reduce el factor de seguridad a la unidad. Esta relación ha sido desarrollada a partir del modelo del bloque deslizante propuesto por Newmark (1965). Las hipótesis que se han considerado para la estimación de las deformaciones han sido las siguientes:

- La masa potencialmente deslizante corresponde a un bloque rígido.
- La resistencia al corte del suelo es igualmente movilizada en el plano potencial de deslizamiento.
- La superficie potencial de deslizamiento se encuentra claramente definida.
- La aceleración de fluencia es constante.

A partir de los resultados obtenidos, considerando el escenario sísmico, se ha podido concluir que los desplazamientos de masa estimados a nivel global en el sector estudiado, se traducirían en deformaciones mínimas que no comprometerían el comportamiento mecánico global de los taludes (Tabla 6). Lo anterior ha sido posible considerando las hipótesis y los criterios de análisis establecidos en el primer escenario de cálculo.

Considerando el escenario sísmico establecido para evaluar la estabilidad mecánica a largo plazo (escenario 2), a partir de los resultados obtenidos, se ha podido concluir que los desplazamientos de masa estimados a nivel global en el sector en estudio, se podrían traducir en deformaciones mínimas que no comprometerían el comportamiento mecánico global de los taludes (Tabla 7), considerando las hipótesis y los criterios de análisis en este segundo escenario de cálculo.

Es importante señalar que, el análisis de la estabilidad mecánica de los taludes a largo plazo, ha sido realizado considerando que los suelos constituyentes del estrato denominado "duna nueva", podrían experimentar un aumento en el estado de compacidad y en los parámetros resistentes, condición que debe ser verificada a futuro.

## 9. Conclusiones

A partir de los resultados que se han obtenido de los análisis realizados, se ha podido concluir que el sector en estudio presentaría, actualmente, una adecuada condición de estabilidad mecánica a corto plazo ( $FS > 1$ ), condición que se podría mantener a largo plazo siempre y cuando se confirmen las hipótesis y criterios de cálculo que se han adoptado en este estudio.

**Tabla 7. Estimación de deslizamientos sísmicamente inducidos. Escenario 2**

Sector	Perfil	Talud medio		F.S	Acel. de fluencia $a_y$ (g)	Acel. Máxima $a_{max}$ (g)	$a_y/a_{max}$	Desplazamientos (cm)		
		(°)	Estático					Mín.	Medio	Máx.
Talud	1	33	1,504	0,278	0,4	0,694	0,2	0,5	1,7	
	2	39	1,471	0,296	0,4	0,741	0,1	0,3	1,0	
	3	34	1,503	0,281	0,4	0,701	0,1	0,5	1,6	

El adecuado comportamiento bajo condiciones sísmicas de los taludes analizados, se vio reflejado durante el terremoto del 3 de marzo del año 1985 al no generarse deslizamientos de masa, como los que fueron observados en una serie de taludes pertenecientes al campo de dunas existente en el sector de Reñaca (Kort, 1985; Musante y Ortigosa, 1985). Este apropiado comportamiento mecánico se podría atribuir a la configuración geométrica que presentan los taludes y a la construcción de convenientes sistemas de contención.

Por otra parte, los árboles existentes pueden disminuir considerablemente la generación de deslizamientos poco profundos o superficiales, debido, principalmente, a la acción de sus raíces que actúan como un sistema de refuerzo, aumentando la resistencia al corte del suelo dentro de los primeros metros de profundidad. Además, la presencia de los árboles tiende a minimizar la acción erosiva del viento y de las aguas lluvia, lo que conlleva a una disminución del movimiento del estrato denominado "duna nueva".

## Referencias Bibliográficas

1. Abe, K. & Ziemer, R. (1991) "Effect of Tree Roots on Shallow-Sheared Landslides". USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-130.
2. Bishop, D.M. & Stevens, M.E. (1964) "Landslide on Logged Areas in Southeast Alaska". U.S Dep. Agric. For Serv. Res. Paper Nor-1, Juneau. AK. USA.
3. Bransby, M.F.; Davies, M.C.R.; Mickovski, S.B.; Sonnenberg, R.; Bengough, A.G. & Hallett, P.D. (2006) "Stabilisation of Slopes by Vegetation Reinforcement".
4. Díaz, E. & Rodríguez-Roa, F. (2007) "Ensayos in-situ en Arenas". VI Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Sociedad Chilena de Geotecnia (SOCHIGE). Octubre 2007.
5. Dismuke, J. (2002) "Seismic Slope Stability and Analysis of the Upper San Fernando Dam".
6. Grimme, K. & Álvarez, L. (1964) "El Suelo de Fundación de Valparaíso y Viña del Mar. Provincia de Valparaíso". Instituto de Investigaciones Geológicas. Boletín N° 16.
7. Kort, I. (1985) Informe de Mecánica de Suelos. "Estabilidad Definitiva de las Calles y Normativas de Contención Adyacentes. Reñaca Norte. SERVIU V Norte". Santiago.
8. Mesri, G.; Feng, T.W. & Benak, J.M. (1990) "Postdensification Penetration Resistance of Clean Sands". Geotech. Eng. Volume 116, Issue 7, pp. 1095- 1115.
9. Musante, H. & Ortigosa de Pablo, P. (1985) "Comportamiento Sísmico de Taludes Arenosos en el Sector de Reñaca. Viña del Mar". "El Sismo del 3 de marzo de 1985-Chile". Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
10. O'Loughlin, C. & Ziemer, R. (1999) "The Importance of Root Strength and Deterioration Rates Upon Edaphic Stability in Steepland Forests".
11. Ruiz, S. & Saragoni, R.G. (2005) "Fórmulas de Atenuación para la Subducción de Chile Considerando los dos Mecanismos de Sismogénesis y los Efectos del Suelo". Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica IX Jornadas, 16-19 de noviembre de 2005, Concepción. Chile.
12. Sanhueza, C y Villavicencio, G. (2010) "Estimación de parámetros resistentes a partir del ensayo de penetración PANDA y su aplicación en el cálculo de la capacidad de soporte y asentamientos del suelo de fundación (1ª Parte). Revista de la Construcción, volumen 9 N°1, pp 120-131.
13. Schmidt, K.M.; Roering, J.J.; Stock, J.; Dietrich, W.E.; Montgomery, D.R. & Schaub, T. (2001) "The variability of root cohesion as an influence on shallow landslide susceptibility in the Oregon Coast Range". Canadian Geotechnical Journal N° 38. pp. 995-1024.
14. Wu T.H.; McKinnel, W.P. & Swanston, D.N. (1979) "Strength of Tree Roots and Landslides on Prince of Wales Island Alaska". Canadian Geotechnical Journal N° 16. pp. 19-33.